

تحلیل پایداری توان در سیستم‌های چند تزریقه HVDC

محمد رضا میرسپاسی و عباس شولائی

چکیده: در این مقاله، براساس همان مفهوم «حداکثر توان قابل انتقال» و بر پایه «ماتریس ژاکوبین تقلیل یافته پخش توان»، دو روش متفاوت به نام‌های استاندارد و مدال (SMPC & MMPC) که دومی به مانند روش مدال تحلیل پایداری ولتاژ (MVSF) با استفاده از تحلیل مدال پیاده می‌شود، به جهت بررسی و مطالعه پایداری توان در مراحل طراحی و برنامه‌ریزی سیستم ارائه گشته است. در این دو روش، فرضیات شبه استاتیکی اعمال شده و از دینامیک‌های پیچیده سیستم HVDC با دقت اغماض گردیده است. به علاوه، هر دو روش با کمک برنامه‌های پخش توان AC/DC و محاسبات عددی (Matlab) برای سیستمی دو مبدله پیاده شده و مرزها و حواشی پایداری (مشخصه‌های پایداری توان) نموده و بحث گردیده‌اند. مقایسه‌ای نیز میان دو روش استاندارد و مدال صورت گرفته و دقیق‌تر بودن روش مدال به اثبات رسیده است. در نهایت، از شبیه‌ساز PSCAD-EMTDC به منظور تصدیق نتایج تئوریک تحلیل‌ها کمک گرفته شده و نتایج شبیه‌سازی‌ها به نمایش در آمده‌اند.

واژه‌های کلیدی: قاب مهاربندی شده برون محور، مقاومت افزون، آنالیز فزاینده استاتیکی غیرخطی، آنالیز دینامیکی افزایشی.

۱. مقدمه

یک تحلیل تئوریک اساسی و جامع از پایداری توان و ولتاژ در لینک‌های نقطه به نقطه HVDC که موجد سیستمی تک‌تزریقه^۱ می‌باشند در مقاله مرجع [۱] ارائه گردید. هم‌چنین در آن مقاله، شاخص‌های پایداری برحسب کمیات و پارامترهای سیستم، محاسبه و روابط دقیق حاصله به دست آمدند. با این وجود، قابل باور است که با راه‌اندازی یک لینک سراسری HVDC در شبکه قدرت ایران و سپس، اتصال آن به شبکه‌های کشورهای مجاور، از جمله ترکیه، شبکه قدرت ساختار یافته به شبکه پیچیده‌تری تبدیل می‌شود که نحوه ارزیابی و مطالعه پایداری توان و ولتاژ آن شبکه با روش‌های متداول سیستم‌های تک‌تزریقه امکان‌پذیر نبوده و تفاوت اساسی خواهد داشت. از طرفی، اتصال سیستم‌های HVDC متفاوت به

یکدیگر به علت ایجاد تقابلات و تعاملات^۲ چندی میان آن‌ها، مسأله پایداری سراسری سیستم را به مخاطره می‌اندازد و به جهت اطمینان از پایدار بودن و ماندن شبکه و به‌طور مثال پایداری توان در لینک-های DC سیستم‌های HVDC، امتیاز محسوب شدن یک روش تحلیلی و در عین حال ساده و سریع در محاسبات نیز پررنگ‌تر شده و عامل دوم در راستای ارایه یک روش تحلیلی به حساب می‌آید. آرایش تک‌تزریقه سیستم‌های HVDC که با اتصال لینکی نقطه به نقطه به شینی از شبکه AC ایجاد می‌شود در شکل ۱ نمایش داده شده است. مطالعات فراوانی در حیطه انواع پدیده‌های تقابلی سیستم تک‌تزریقه HVDC، از جمله؛ اضافه ولتاژهای موقتی، خطر ناپایداری ولتاژ و توان، تشدید در فرکانس‌های پایین، ناپایداری اشباع هسته و دیگر پدیده‌های پراهمیت، در دو دهه گذشته صورت گرفته است که از مورد استفاده‌ترین آن‌ها، جزوه جمع‌آوری شده توسط گروه علمی مشترکی از IEEE و CIGRE می‌باشد [2]. در این راستا، تحلیلی اساسی از پایداری ولتاژ و توان سیستم‌های تک‌تزریقه HVDC نیز توسط مولفین همین مقاله ارایه گشته است [۱].

سیستم‌های چند تزریقه HVDC که با اتصال شبکه‌های قدرت کشورهای مختلف به یکدیگر به سرعت در حال شکل‌گیری و رشدند و آرایش سه مبدله آنها در شکل ۲ نمود یافته است، از جنبه مطالعات پدیده‌های تعاملی در حد بسیار پائینی قرار دارند. انتشار مقالاتی در راستای این مطالعات، در سطح جهان به دهه گذشته باز

نسخه اصلی مقاله در تاریخ ۱۳۸۲/۴/۲۱ واصل، و پس از بازنگری‌های لازم، در تاریخ ۱۳۸۳/۱۱/۵ به تصویب نهایی رسیده است.

سرپرستی داوری‌ها توسط دبیر تخصصی، دکتر حجت کاشانی صورت گرفته و مقاله توسط ایشان برای چاپ توصیه شده است.

محمد رضا میرسپاسی، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت، دانشگاه علم و صنعت ایران.

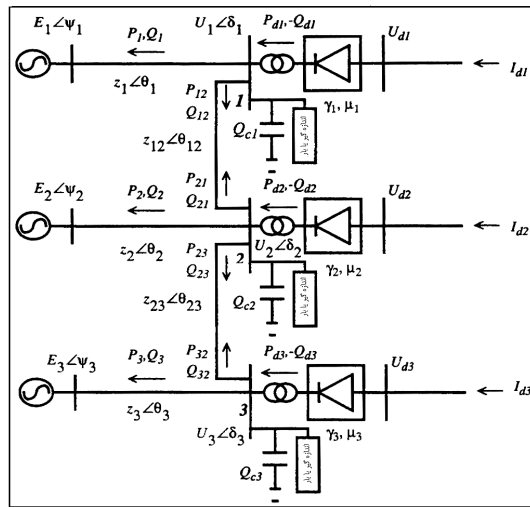
دکتر عباس شولائی، استاد گروه قدرت، دانشگاه علم و صنعت ایران،
shoulaie@iust.ac.ir

² Interactions

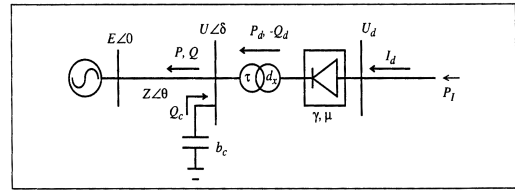
¹ Single-Infeed HVDC System (SIF)

توان) به همراه نتایج شبیه‌سازی که تأیید کننده تحلیل‌های تئوریک ریاضی خواهند بود در انتها بحث می‌گردند.

می‌گردد و این، دلیلی بر لزوم تحقیقات و برنامه‌ریزی‌های بیش‌تر است.



شکل ۲. سیستم سه تریقه HVDC (تزریق از سمت اینورتری) [۳]



شکل ۱. مدل ساده شده لینک DC و شبکه AC در سمت اینورتری آرایش تک‌تریقه [۳]

انواع و ساختارهای مختلفی از سیستم‌های چند تریقه HVDC به-علاوه مطالعه روی تقابلات درونی سیستم‌های AC/DC مختلف و کنترل‌کننده‌های موجود در دو طرف لینک‌های DC، با استفاده از شبیه‌سازی روی یک سیستم عملی در [4] ارائه شده است. مشکلات متعدد برخاسته از سیستم‌های چند تریقه HVDC، از جمله: ناپایداری و فروپاشی ولتاژ، افت گذرای ولتاژ AC به علت بازیافت هم‌زمان لینک‌ها پس از یک خطای شدید AC، افزایش خطاهای کموتاسیون در یک لینک به سبب حدوث خطاهای AC در سیستم-های همسایه و ناپایداری سیگنال کوچک به واسطه تقابلات کنترلی میان لینک‌های DC، مواردیست که در [5] بحث مختصر و مفیدی شده‌اند. تحقیقی دیگر که با استفاده از نتایج شبیه‌ساز دیجیتالی، پاسخ‌های گذرا و بازیافت سیستم‌های چند تریقه از خطاهای شدید AC را مطالعه نموده و تأثیر راهکارهای مختلف کنترلی و تغییر پارامترهای کنترل‌کننده‌های لینک‌های HVDC را بررسی کرده از کارهای با ارزش محسوب می‌شود که در [6] معرفی شده است. همچنین، مدولاسیون گشتاورهای سنکرون‌کننده و میراساز که برای کنترل‌های موجود در لینک‌های DC یک سیستم چند تریقه استفاده می‌شوند، عنوان کار دیگریست که مؤثر بودن هماهنگی مناسب میان کنترل‌های لینک‌ها را به جهت پایداری الکترومکانیکی سیستم به تثبیت رسانده است [7].

۲. روش‌های تحلیل پایداری توان و ولتاژ در سیستم‌های تک‌تریقه HVDC

همه پارامترها و کمیات مورد استفاده در تحلیل پایداری توان و ولتاژ سیستم تک‌تریقه HVDC با علائم و نمادهای اختصاری روی شکل ۱ مشخص و در بند (الف) ضمایم به طور کامل معرفی شده‌اند. مطالعه پایداری توان و ولتاژ اساساً با فرضیات شبه استاتیکی و کمیات فرکانس اصلی در مقیاس زمانی که کندتر از سرعت پاسخ-دهی کنترل‌کننده جریان لینک DC و تندتر از پاسخ کنترل دینامیکی ولتاژ در شبکه AC (AVR) باشد انجام می‌گردد. بدین علت، ولتاژ معادل تونن شبکه AC در طول تحلیل ثابت حفظ شده و از همه دینامیک‌ها صرف‌نظر می‌شود و تحلیل نیز بر اساس آنالیز حساسیت متغیرهای حالت (سیستم) و متغیرهای کنترلی پیاده می‌گردد.

به منظور تحلیل پایداری توان، اول بار روشی بر پایه مفهوم «حداکثر توان قابل انتقال» (MAP) برای اینورتری که در مد زاویه خاموشی ثابت^۱ کار می‌گردد ارائه شد که تحت عنوان روش «پوش حداکثر توان»^۲ (MPC) شناخته می‌شود [8]. در این روش، با افزایش جریان DC و ثابت بودن ولتاژ شبکه AC، توان لینک DC افزایش می‌یابد که در نقطه اوج پوش توان حداکثر به حد پایداری توان می‌رسد. تحت شرایط نامی، یعنی: $I_d = U_d = U = \dots = 1 \text{ p.u.}$ ، اگر نقطه کار واقعی اولیه منطبق بر نقطه اوج پوش P_d / I_d باشد حاشیه پایداری توان صفر خواهد بود و نسبت اتصال کوتاه^۳

با این همه، اساس پدیده‌ها در سیستم‌های چند تریقه مشابه سیستم‌های تک‌تریقه می‌باشند و برای تحلیل و مطالعه آنها، بسط روش‌های قدیم و توسعه آنها به فرم مورد قبول برای آرایش چند تریقه کافی خواهد بود. پس، به منظور محدود نمودن بحث به مشکل ناپایداری توان/ولتاژ در سیستم‌های چند تریقه HVDC، اولاً باید آن را در مباحث ویژه به حساب آورد چرا که، اهمیت خاصی را در مرحله طراحی و برنامه‌ریزی سیستم می‌طلبد و از این‌رو، ابتدا، مختصری از روش‌های تحلیل پایداری توان و ولتاژ در سیستم‌های تک تریقه HVDC مطرح و سپس دو روش تئوریک به جهت مطالعه پایداری توان در سیستم‌های چند تریقه HVDC ارائه و تفاوت آن دو با توجه به مشخصه‌های پایداری حاصله اثبات می‌گردد. همچنین، نمایش حدود و حواشی پایداری (مشخصه‌های پایداری

¹ Constant Extinction Angle Control Mode

² Maximum Power Curve (MPC)

³ Short-Circuit Ratio (SCR)

اسمی (U_{Ni})، سیستم مرجع فرض گردد، نسبت اتصال کوتاه مؤثر برای این سیستم از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$ESCR_i = \frac{1}{Z_i} - Q_{cni} \quad (3)$$

با تعریف «نسبت پایه توان DC»^۵ (PBR) می‌توان نسبت اتصال کوتاه را در سیستم‌های دیگر نیز به دست آورد و بنابراین:

$$PBR_j = \frac{P_{dnj}}{P_{dni}} \quad (4)$$

$$ESCR_j = \frac{1}{PBR_j} \left(\frac{1}{Z_j} - Q_{cnj} \right) \quad (5)$$

همه مقادیر امپدانس معادل شبکه AC و میزان جبران‌سازی بانک‌های شانت خازنی در روابط (۳) و (۵)، نسبت به U_{Ni} و P_{dni} در واحد می‌شوند و در نهایت نسبت اتصال کوتاه لینک ز ام $(ESCR_j)$ نسبت به پایه توان DC همان لینک (P_{dnj}) که باید محاسبه گردد، به دست خواهد آمد.

۴. مدل‌سازی ریاضی سیستم و محاسبه ماتریس

ژاکوبین تقلیل یافته پخش توان PI

مدل‌سازی ریاضی سیستم چند تزریق با حذف شین‌های منابع تونن AC و بر اساس معادلات عدم تطابق پخش توان به دست می‌آید. بدین منظور، معادلات پخش توان در پایانه‌های DC و شین‌های AC مبدل‌های HVDC به صورت کلی زیر نوشته می‌شوند:

$$\Delta P_{DCi} = P_{di} - P_{dli} : \text{DC سیستم} \quad (6)$$

$$\Delta P_{DCi} = P_{di} - P_{dli} : \text{DC سیستم} \quad (7)$$

$$\Delta Q_{ACi} = Q_i + Q_{ij} + Q_{di} - Q_{ci} : \text{AC سیستم} \quad (8)$$

متغیرهای استفاده شده در معادلات سه‌گانه پخش توان فوق عبارتند از:

ΔP_{DCi} : تغییرات توان DC در پایانه DC، i - امین مبدل

ΔP_{ACi} : تغییرات توان اکتیو در شین AC، i - امین مبدل

ΔQ_{ACi} : تغییرات توان راکتیو در شین AC، i - امین مبدل

P_i, P_{ij}, P_{di} : توان‌های اکتیو تزریق شده به یا از شین AC، i - امین مبدل

$Q_i, Q_{ij}, Q_{ci}, Q_{di}$: توان‌های راکتیو تزریق شده به یا از شین AC، i - امین مبدل

P_{dli} : توان DC تزریق شده به شین DC، i - امین مبدل

توجه کنید که اندیس‌های i و j به ترتیب برای پایانه‌های DC و شین‌های AC بوده و اندیس‌های d و c نیز به ترتیب مربوط به کمیات DC مبدل‌ها و کمیات شانت شین‌های AC می‌باشند. در

ضمن، برای حالت ساده سیستم دو مبدله؛ $i, j = \{1, 2 | i \neq j\}$.

حال با در نظر گرفتن متغیرهای حالت U, I_d و δ ، خطی شده معادلات پخش توان با کمک روابط توان‌های اکتیو و راکتیو که در

که قوت الکتریکی اتصال AC/DC را نشان می‌دهد $\left(SCR = \frac{1}{Z_{p.u.}} \right)$

به نسبت بحرانی اتصال کوتاه (CSCR) تغییر نام می‌دهد. نسبت مؤثر اتصال کوتاه^۱ $(ESCR = SCR - Q_{CN_{p.u.}})$ که با لحاظ کردن تأثیر جریان‌سازهای شانت خازنی و فیلترهای AC، کمیت دقیق‌تری از قوت اتصال AC/DC به حساب می‌آید نیز به نسبت مؤثر بحرانی^۲ (CESCR) تغییر می‌یابد. این مقدار که نشان‌گر حد پایداری توان در آرایش تک‌تزریق می‌باشد با حل معادله زیر بدست می‌آید که در مقاله [۱] برحسب کمیات و پارامترهای سیستم محاسبه شده است.

$$\frac{dP_d}{dI_d} = 0 \quad (1)$$

پایداری ولتاژ نیز با محاسبه نسبت میان تغییرات ولتاژ شین AC کموتاسیون (ΔU) و تغییرات تزریق توان راکتیو به آن شین (ΔQ)، یعنی حساسیت ولتاژ^۳، به عنوان روشی برای تعیین «شاخص پایداری ولتاژ»^۴ (VSF) معرفی شده است که بدین وسیله، حاشیه پایداری ولتاژ قابل تعیین است [۱] و [9,10].

$$VSF = \frac{\Delta U}{\Delta Q} \Big|_{p = p_0} \quad (2)$$

مسلماً هر مقدار کوچک مثبت برای VSF، عمل‌کردی پایدار را تثبیت می‌کند ولی با افزایش VSF از حاشیه پایداری ولتاژ کاسته و در مقدار $VSF = \infty$ ، سیستم به حد پایداری ولتاژ می‌رسد. روابط دقیق شاخص‌های پایداری ولتاژ (VSF) و پایداری توان (CESCR) حاصله از معادله (۱) برحسب کمیات و پارامترهای اساسی سیستم تک‌تزریق در سمت اینورتری، در مقاله [۱] به دست آمده و مشخصه‌های پایداری در سه مد کنترلی مختلف نشان داده شده‌اند. همچنین، نتایج شبیه‌سازی در راستای تأیید موضوعیت تئوریک تحلیل‌های پایداری و روابط آن به نمایش درآمده‌اند و از این‌رو، مرجع نامبرده به عنوان مقدمه‌ای در فهم تحلیل شبه‌استاتیکی پایداری توان سیستم چند تزریق این مقاله معرفی می‌شود.

۳. مفاهیم اساسی در ارزیابی پایداری توان (و ولتاژ) در

سیستم‌های چند تزریق HVDC

با توجه به وجود دو یا چند لینک در یک سیستم چند تزریق که توان‌های DC نامی آن‌ها مستقل از هم می‌باشند، باید یکی از لینک‌ها را به عنوان مرجع معرفی کرد و توان DC نامی آن را به عنوان MVA پایه سیستم و ولتاژ اسمی شین AC اینورتری همان سیستم را به عنوان ولتاژ پایه سیستم در نظر گرفت تا تعریف نسبت‌های اتصال کوتاه که از مهم‌ترین مفاهیم در تعیین حدود و حواشی پایداری ولتاژ به حساب می‌آیند چند پهلو و مبهم نگردد [11]. پس اگر i امین لینک با توان DC نامی (P_{dni}) و ولتاژ AC

¹ Effective Short-Circuit Ratio (ESCR)

² Critical ESCR

³ Voltage Sensitivity

⁴ Voltage Stability Factor (VSF)

⁵ Power Base Ratio

$$\left. \frac{\Delta P_{DCi}}{\Delta I_{di}} \right|_{\Delta I_{dj} = 0} = J_{MPC_{ii}} \quad i, j = 1, 2 | i \neq j \quad (15)$$

زمانی که $J_{MPC_{ii}}$ ، یعنی عنصر قطری ماتریس J_{MPC} ، صفر باشد حد پایداری توان سیستم دو تزیقه بر اساس روش استاندارد فرا رسیده است که به مانند رابطه (۱) در سیستم‌های تک تزیقه خواهد بود. رابطه فوق را این گونه تعبیر می‌شود که برای مقدار مشخصی از جریان DC ثابت در یکی از لینک‌ها، با توجه به جریان DC سیستم دیگر که درجه آزادی تغییر دارد، میزان توان DC که منجر به صفر شدن یکی از درایه‌های قطری ماتریس J_{MPC} می‌شود، حداکثر توان قابل انتقال (MAP) آن سیستم خواهد بود.

در کاربردهای عملی باید رابطه (۱۵) را برحسب پارامترهای اصلی سیستم دو تزیقه از قبیل، ESCR1، ESCR2، و Z_{12} و ... محاسبه و مشخصه آن را به دست آورد. مرز پایداری توان مطابق با مقادیری از پارامترهای سیستم خواهد بود که صفرهای $J_{MPC_{ii}}$ را تعیین می‌کنند. مشابه تحلیل پایداری توان در سیستم‌های تک تزیقه در اینجا نیز می‌توان از مشخصه‌های P_d/I_d به جهت تعیین حاشیه پایداری توان بهره برد. در این وضعیت باید نقطه شروع در همه مبدل‌های HVDC با شرایط نامی باشد و ابتدا دامنه‌های ولتاژ در شین‌های تونن شبکه‌های AC محاسبه و ثابت حفظ گردد. سپس این مقادیر و همه جریان‌های DC به غیر از آن که درجه آزادی تغییر دارد ثابت نگه داشته شده و توان DC با تغییر جریان DC سیستمی که درجه آزادی دارد به دست آید. این عمل را برای مقادیر مختلف جریان‌های DC ثابت در سیستم دیگر می‌توان تکرار نمود. هر یک از این مقادیر یک پوش از توان DC را نسبت به جریان DC متغیر به دست خواهند داد. پوش‌های حاصله، پوش‌های استاندارد حداکثر توان (SMPC) خطاب می‌گردند.

واضح است که با تغییر جریان DC در سیستمی که درجه آزادی ندارد یک نمودار سه بعدی که همه پوش‌ها را شامل می‌شود به دست خواهد آمد. شکل ۳ با فرضیات $ESCR1=1.0$ ، $ESCR2=3.0$ و $Z_{12}=0.6 \text{ p.u.}$ و برای مقادیر ثابت I_{dN2} به فواصل 0.1 از 0.1 تا $1/6$ در واحد، نمودار سه بعدی پوش‌های استاندارد حداکثر توان را برای سیستمی دو مبدل نشان می‌دهد. نسبت پایه توان (PBR)DC در این حالت معادل I_{dN2} خواهد بود چرا که $PBR = \frac{P_{dN2}}{P_{dN1}} = U_{dN2} I_{dN2} = I_{dN2}$ مسلماً برای هر یک از پوش‌های استاندارد به دست آمده یک نقطه اوج (MAP) وجود دارد که همان حد پایداری توان است و فاصله آن تا نقطه کار اسمی سیستم حاشیه پایداری توان را تعیین می‌کند (مثلاً دو نقطه P_1 و P_2 روی شکل ۳).

این نوع از مشخصه‌های سه بعدی به منظور ارزیابی پایداری توان در سیستم‌های چند تزیقه مفیدند ولی مشخصه‌های دو بعدی در موقعیت‌های کاربردی اهمیت بیشتری دارند. در شکل ۴ که برای همان سیستم مشخصه I_{d1} را برحسب I_{dN2} نشان می‌دهد، مرز

مراجع [۳ و ۱] تماماً محاسبه گردیده‌اند قابل محاسبه خواهد بود و بالاخره ماتریس معادلات معنونه به صورت زیر قابل دستیابی است.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{DC} \\ \Delta P_{AC} \\ \Delta Q_{AC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{DI} & J_{D\delta} & J_{DU} \\ J_{PI} & J_{P\delta} & J_{PU} \\ J_{QI} & J_{Q\delta} & J_{QU} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_d \\ \Delta \delta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (9)$$

در رابطه ماتریسی فوق، ΔI_d ، $\Delta \delta$ و $\frac{\Delta U}{U}$ به ترتیب بردار تغییرات جریان‌های DC لینک‌ها، بردار تغییرات زوایای ولتاژ در شین‌های AC مبدل‌ها و بردار تغییرات دامنه‌های ولتاژ شین‌ها می‌باشند. زیرماتریس‌های ژاکوبین در ماتریس ژاکوبین رابطه (۹) نیز با استفاده از مشتقات جزئی معادلات توان‌های اکتیو و راکتیو نسبت به پارامترهای I_d ، δ و U قابل محاسبه‌اند که برای آرایش دو تزیقه سیستم‌های HVDC محاسبه و به طور کامل در بند (ب) ضمیمه درج شده‌اند. قابل درک است که ماتریس ژاکوبین فوق برای سیستمی n - تزیقه یک ماتریس $3n \times 3n$ خواهد شد.

با این فرض که هیچ تزیق توان اکتیو یا راکتیوی به شین‌های AC مبدل‌ها وجود ندارد می‌توان ΔP_{ACi} و ΔQ_{ACi} را صفر قرار داد و رابطه ماتریسی (۹) را به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{DC} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{DI} & 0 & J_{DU} \\ J_{PI} & J_{P\delta} & J_{PU} \\ J_{QI} & J_{Q\delta} & J_{QU} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_d \\ \Delta \delta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (10)$$

با حل معادلات حاصله از رابطه ماتریسی (۱۰) نتایج زیر به دست می‌آید:

$$\Delta \delta = -J_{P\delta}^{-1} \left[J_{PU} \frac{\Delta U}{U} + J_{PI} \Delta I_d \right] \quad (11)$$

$$\frac{\Delta U}{U} = -(J_{QU} - J_{Q\delta} J_{P\delta}^{-1} J_{PU})^{-1} (J_{QI} - J_{Q\delta} J_{P\delta}^{-1} J_{PI}) \Delta I_d \quad (12)$$

با استفاده از دو رابطه (۱۱) و (۱۲)، رابطه ماتریسی (۱۰) به صورت زیر تقلیل می‌یابد:

$$\Delta P_{DC} = J_{MPC} \Delta I_d \quad (13)$$

$$J_{MPC} = J_{DI} - J_{DU} (J_{QU} - J_{Q\delta} J_{P\delta}^{-1} J_{PU})^{-1} (J_{QI} - J_{Q\delta} J_{P\delta}^{-1} J_{PI}) \quad (14)$$

به ماتریس ژاکوبین J_{MPC} حاصله که برای سیستم دو مبدل ماتریسی 2×2 است، ماتریس ژاکوبین تقلیل یافته پخش توان جریان - توان DC (PI) گفته می‌شود که به منظور ارزیابی و مطالعه پایداری توان در سیستم‌های چند تزیقه ابزار مورد استفاده است.

۵. روش‌های تحلیل پایداری توان در سیستم‌های چند

تزیقه HVDC

۵-۱. روش پوش استاندارد حداکثر توان (SMPC)

در این روش تنها یک درجه آزادی تغییر به جریان‌های DC داده می‌شود و باقی آن‌ها ثابت فرض می‌گردند. بنابراین، با کمک ماتریس ژاکوبین کاهش یافته PI (رابطه (۱۴)) می‌توان به نتیجه زیر دست یافت:

درجه آزادی متغیرهای جریان نخواهد بود. قابل توجه اینکه تحلیل مدال به جهت مطالعه و بررسی روی مسائل پایداری توان و ولتاژ سیستم‌های قدرت کاربرد وسیعی دارد که اساساً در این روش، از ماتریس ژاکوبین پخش توان برای تشخیص مقدار ویژه حداقل که همان مقدار ویژه بحرانی به جهت تعیین پایداری سیستم است استفاده می‌گردد [12].

بنابراین با تجزیه ماتریس J_{MPC} به معادل مقادیر ویژه‌ای آن رابطه زیر به دست می‌آید:

$$J_{MPC} = \xi \Lambda_{MPC} \eta \quad (16)$$

ξ ، η و Λ_{MPC} به ترتیب، ماتریس‌های بردارهای ویژه راست، بردارهای ویژه چپ و ماتریس قطری مقادیر ویژه J_{MPC} می‌باشند. حال با استفاده از رابطه (16) در رابطه (13) و با توجه به برابری $\eta^{-1} = \xi^{-1}$ ، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\Delta P_{dc} = \Lambda_{MPC} \Delta i_{dc} \quad (17)$$

در رابطه فوق $\Delta P_{dc} = \eta \Delta P_{DC}$ و $\Delta i_{dc} = \eta \Delta I_d$ بردارهای مدال توان DC و جریان DC بوده و k -امین مد را به صورت زیر می‌توان تعیین کرد:

$$\frac{\Delta P_{dc_k}}{\Delta i_{dc_k}} = \lambda_{MPC_k} \quad (18)$$

$$\begin{cases} \Delta P_{dc_k} = \sum_{j=1}^n \eta_{kj} \Delta P_{DCj} \\ \Delta i_{dc_k} = \sum_{j=1}^n \eta_{kj} \Delta I_{dj} \end{cases} \quad k \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (19)$$

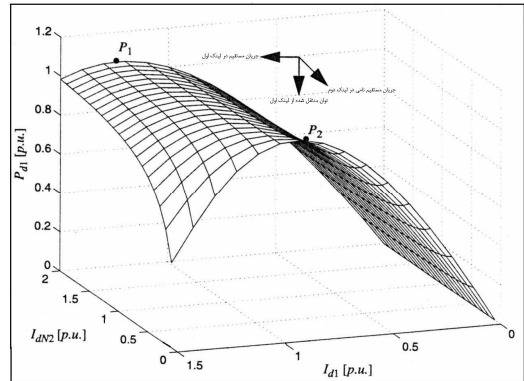
n ، تعداد شین‌های AC اینورترهای مبدل‌های HVDC است. بنابراین، رابطه مدال فوق برای سیستم چند تزریقه HVDC در حالت کلی به دست آمده و محدودیتی روی تعداد لینک‌های DC نیست.

پرواضح است که علامت مقدار ویژه در رابطه (18) تعیین‌کننده جهت تغییرات توان نسبت به جریان است. مسلماً مقادیر مثبت سبب تغییرات مثبت توان DC مدال در پاسخ به تغییرات مثبت جریان DC مدال خواهند شد و عکس این قضیه برای مقادیر ویژه منفی برقرار است. زمانی که حداقل مقادیر ویژه صفر باشد، حد پایداری توان فرا رسیده است. بنابراین، شرایط کاری سیستم که صفر شدن رابطه (18) را ارضا می‌کنند همان نقاط «حداکثر توان قابل دستیابی مدال»^۱ (MMAP) خواهند بود. در نتیجه، مقادیر ویژه مثبت عمل کرد پایدار و مقادیر ویژه منفی عمل کرد ناپایدار را نشان خواهند داد و برای داشتن رفتاری پایدار از توان DC همه لینک‌های سیستم چند تزریقه برقراری شرط زیر لازم است:

$$\lambda_{MPC} > 0 \quad (20)$$

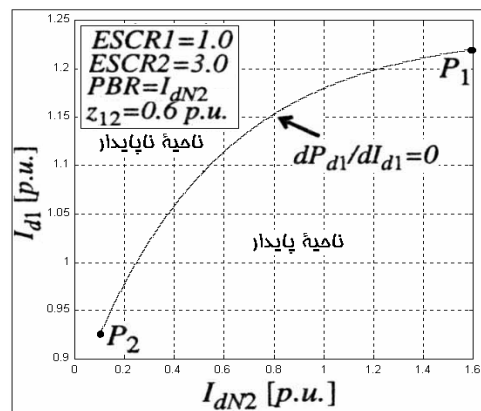
بهمانند روش استاندارد، در کاربردهای عملی باید رابطه (18) را به صورت تابعی از پارامترهای سیستم مثل Z_{12} ، $ESCR1$ ، $ESCR2$ ، P_{dN2} و P_{dN1} (یا PBR) محاسبه نمود. به این ترتیب می‌توان

پایداری توان قابل مشاهده است که تمام نقاط روی این منحنی، نقاط MAP سیستم دو تزریقه خواهند بود. نواحی پایدار و ناپایدار روی شکل تمییز داده شده‌اند. دقیقاً همین مشخصه را برای حالتی که I_{d1} پارامتر ثابت و I_{d2} پارامتر متغیر در نظر گرفته شوند می‌توان به دست آورد ولی از آنجائی که با فرض $ESCR1=1.0$ سیستم AC/DC اول ضعیف‌تر است این مشخصه کارایی بهتری خواهد داشت. بنابراین، منحنی شکل ۴ مرز پایداری توان در سیستم دو تزریقه بر اساس روش استاندارد خواهد بود.



شکل ۳. نمودار سه بعدی پوش‌های استاندارد حداکثر توان

در سیستم دو تزریقه HVDC [۳]



شکل ۴. مرز پایداری توان در سیستم دو تزریقه HVDC بر

اساس روش SMPC

۲-۵. روش پوش مدال حداکثر توان (MMPC)

از آنجائی که در روش استاندارد تنها یک درجه آزادی برای تغییرات جریان DC وجود دارد باید گفت، نحوه ارزیابی پایداری توان با استفاده از روش SMPC یک ارزیابی محلی یا با شرایط ویژه است. روش دیگر با استفاده از تکنیک تجزیه به مقادیر ویژه روی ماتریس J_{MPC} به دست آمده از رابطه (14) پیاده می‌شود که در واقع از روش تحلیل مدال استفاده خواهد شد و بدین علت، به روش پوش مدال حداکثر توان (MMPC) نامیده می‌شود. این روش ارزیابی کلی‌تری را از پایداری توان به دست می‌دهد و دیگر محدودیتی روی

^۱ Modal MAP

دترمینان ماتریس J_{MPC} است می توان رابطه زیر را برای سیستم دو تزریق نوشت:

$$\det(J_{MPC}) = J_{MPC11} \cdot J_{MPC22} - J_{MPC12} \cdot J_{MPC21} = 0 \quad (21)$$

وقتی سیستم در آغاز پایدار باشد و با تغییر بعضی از پارامترهای سیستم به ناپایداری نزدیک گردد، درایه های J_{MPC11} و J_{MPC22} لزوماً مثبت خواهند بود. از طرفی، حاصل ضرب دو درایه دیگر نیز باید مثبت باشد تا $\det(J_{MPC})$ صفر شود.

در نقطه ای که این دترمینان صفر می شود چون دو حاصل ضرب $J_{MPC11} \cdot J_{MPC22}$ و $J_{MPC12} \cdot J_{MPC21}$ مخالف صفرند می توان به نابرابری زیر دست یافت:

$$J_{MPCii} = \frac{J_{MPCij} \cdot J_{MPCji}}{J_{MPCjj}} > 0 \quad i \neq j \quad (22)$$

با دقت به این نابرابری می توان معادل نبودن شرایط حد پایداری توان از دو روش استاندارد و مدال را صحت گذاشت. فی الواقع، زمانی - که شرط مرز پایداری توان در روش MMPC فرا می رسد یعنی $\det(J_{MPC})$ صفر می شود هنوز شرط مرز پایداری توان در روش SMPC فرا نرسیده است چرا که، J_{MPCii} مثبت بوده و صفر نشده است. بنابراین، در قیاس با روش استاندارد، روش مدال محافظه کارانه تر بوده و ناحیه پایدار کوچک تری را مشخص می کند. به طور حسی نیز به چنین نتیجه ای می توان رسید چرا که در روش MMPC درجات آزادی بیشتری به تغییرات جریان DC داده می شود و این خود موجب ناپایدار شدن سیستم خواهد شد.

شکل ۷ این واقعیت را نشان داده است. هر دو مشخصه که در شرایط و پارامترهای معادلی از سیستم دو تزریق در صفحه $I_{d1} - I_{dN2}$ به دست آمده اند، تنها در روش حل مرز پایداری متفاوت می باشند. در واقع، یکی با اعمال شرط $\frac{dP_{d1}}{dI_{d1}} = 0$ و دیگری با اعمال شرط $\lambda_{MPC} = 0$ حاصل آمده اند که مطابق تعریف روش های تحلیل، اولی مرز پایداری توان را از روش SMPC و دومی از روش MMPC محاسبه نموده اند که ناهمسانی نتایج اخذ شده بارز است. همان طور که می بینید، ناحیه پایدار در روش MMPC کوچک تر بوده و حالت محافظه کارانه تر و البته دقیق تری دارد.

۷. نتایج شبیه سازی

در این بخش، نتایج شبیه سازی به جهت تصدیق نتایج تئوریک تحلیل های پایداری توان بر طبق دو روش استاندارد و مدال و نیز به منظور تأیید عدم تطابق و ناهمزمانی حواشی پایداری توان حاصله از دو روش پیش گفته شده به نمایش درآمده و بحث می گردند. بدین جهت، از آنجائی که درجه آزادی تغییرات جریان DC در روش SMPC محدودیت دارد و تنها به یک لینک اجازه تغییر جریان داده می شود، در شبیه سازی سیستم دو تزریق نیز از ترکیب کنترلی PI (یعنی یک لینک در مد توان ثابت/زاویه خاموشی ثابت و دیگری در مد جریان ثابت/زاویه خاموشی ثابت) استفاده گردیده است.

مشخصه هایی را به صورت دو بعدی برای ارزیابی مرز پایداری توان حاصل آورد که این مرز معادل $\lambda_{\min} = 0$ خواهد بود (مشخصه های $P_{dN1} - P_{dN2}$ و ESCR1-ESCR2 با شرط $\lambda_{\min} = 0$ کاربرد عملی بیش تری دارند).

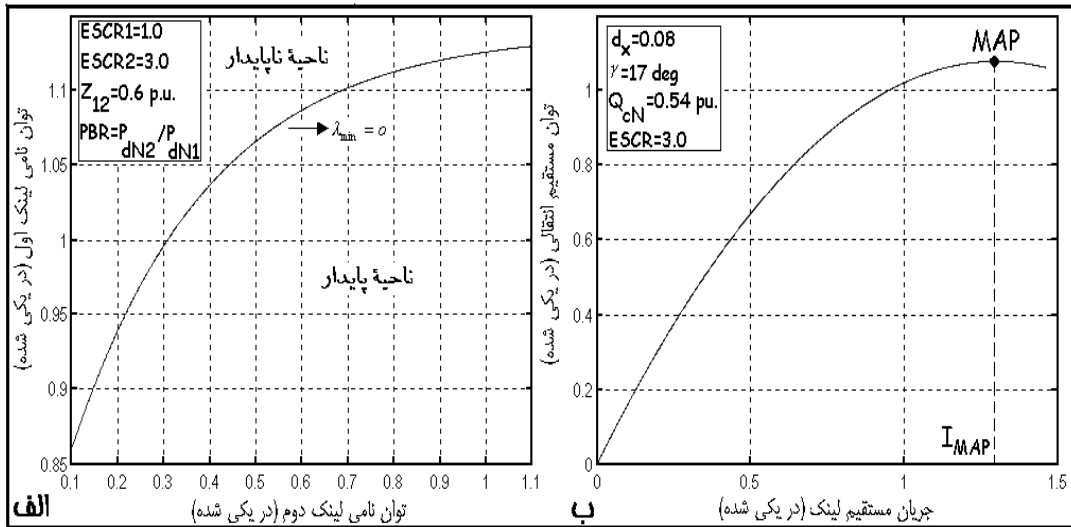
شکل (۵- الف) با فرضیات نوشته شده روی آن، مرز پایداری توان را در مشخصه $P_{dN1} - P_{dN2}$ برای سیستمی دو مبدله نشان می دهد. منحنی به دست آمده از شرط $\lambda_{\min} = 0$ حاصل شده که همان حد پایداری توان است. تمام نقاط روی این مرز مقادیر MAP را در دو سیستم HVDC تعیین می کنند چرا که در آن نقاط، مقدار ویژه حداقل صفر شده است. برای تک تک این نقاط، مثل سیستم تک- تزریق یک پوش حداکثر توان به دست می آید که در نقطه اوج آن مقدار $\frac{dP_d}{dI_d}$ در سیستم معادل صفر می گردد. شکل (۵- ب) یکی از این پوش ها را نشان می دهد که برای پارامترهای مشخص شده روی شکل به دست آمده است.

نوع پرکاربردتر مشخصه های پایداری توان در سیستم های چند تزریق، برای سیستمی دو مبدله با فرضیات نوشته شده روی شکل در شکل (۶- الف) به نمایش در آمده است (مشخصه ESCR1-ESCR2). در این حالت نیز، مرز پایداری توان با استفاده از منحنی $\lambda_{\min} = 0$ به دست آمده که هر نقطه روی این منحنی، تعیین کننده نسبت های بحرانی اتصال کوتاه برای دو سیستم AC/DC می باشد و بدین جهت، فضای بالای مرز ناحیه پایدار و فضای پائین آن ناحیه ناپایدار را منفک می کند. باز هم بمانند سیستم های تک تزریق که در نقطه اوج پوش P_d / I_d دارای نسبت بحرانی (CESCR) خاصی هستند منحنی شکل (۶- الف) قابل توجه است. در شکل (۶- ب) با همان فرضیات شکل (۵- ب) پوش حداکثر توان به گونه ای با تغییر نسبت اتصال کوتاه به دست آمده است که نقطه MAP سیستم منطبق بر نقطه کار اسمی آن شود. بنابراین، نسبت اتصال کوتاه فرض شده همان نسبت بحرانی (CESCR) سیستم می باشد که حد پایداری توان را تعیین می کند. توجه شود که هر دو روش تحلیل پایداری توان که در این بخش ارائه شدند برای سیستمی که هر دو لینک در مد کنترلی توان ثابت/زاویه خاموشی ثابت (CEA/CP) کار می کند پیاده گشته اند.

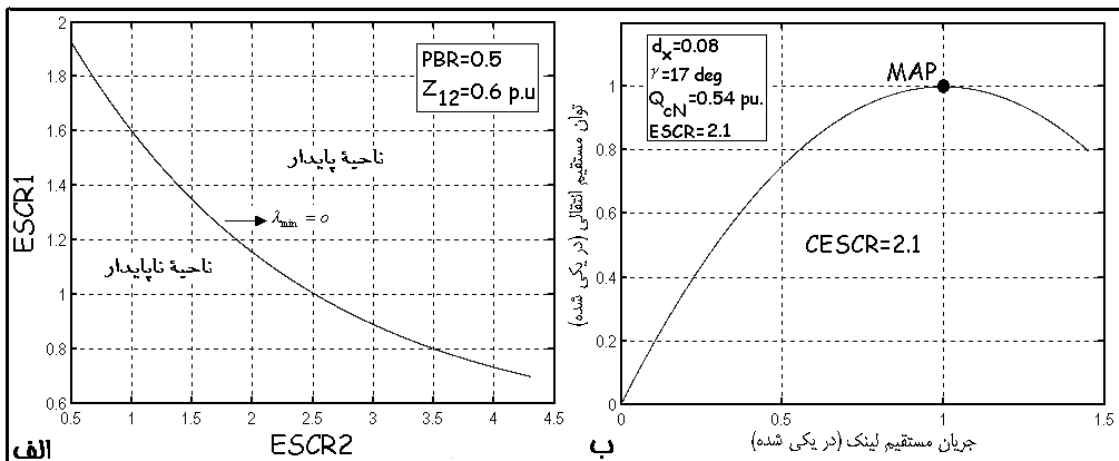
۶. مقایسه میان دو روش استاندارد و مدال تحلیل

پایداری توان در سیستم های دو تزریق HVDC

همان طور که در بخش پیشین عنوان شد، حد پایداری توان برای سیستم دو مبدله از روش SMPC زمانی فرا می رسد که درایه ای قطری از ماتریس J_{MPC} صفر گردد (به رابطه (۱۵) دقت کنید). اما، مرز پایداری توان با استفاده از روش MMPC برای شرایطی است که مقدار ویژه حداقل ماتریس J_{MPC} در رابطه (۱۸) معادل صفر شود. حال که، شرط مرز پایداری در روش مدال معادل صفر شدن



شکل ۵. الف) مرز پایداری توان در سیستم دو تزریق HVDC (تعیین MAP سیستم دو تزریق) (ب) پوش حداکثر توان در سیستم تک تزریق (MAP سیستم تک تزریق دو)



شکل ۶. الف) مرز پایداری توان در سیستم دو تزریق HVDC (تعیین CESCR سیستم دو تزریق) (ب) پوش حداکثر توان در سیستم تک تزریق (CESCR در سیستم تک تزریق)

استفاده شده بر طبق تحلیل‌های تئوریک مشخص شود تا با نتایج شبیه‌سازی قیاس گردد.

در جدول ۱ نیز، پارامترها و کمیات اصلی سیستم دو مبدله که برای شبیه‌سازی‌ها استفاده گردیده است به همراه روش تحلیل پایداری و نقطه کار مورد نظر عنوان و درج گردیده‌اند.

با توجه به نقطه کار X_2 روی شکل ۸ عدم هم‌زمانی مرزهای پایداری توان بر طبق دو روش استاندارد و مدال واضح است. همان‌طور که پیداست، این نقطه کار در ناحیه پایدار مرز استاندارد حداکثر توان قرار گرفته است و از طرفی، در ناحیه ناپایدار مرز مدال حداکثر توان است. شکل ۹ نتایج شبیه‌سازی سیستم دو مبدله را در ترکیب کنترلی PP (روش MMPC) و به دنبال اغتشاش مفروض نشان می‌دهد که ناپایداری توان بارز است. عکس این وضعیت در شکل

در اینجا سیستم AC/DC اول در مد CEA/CP و سیستم AC/DC دوم در مد CEA/CC کنترل شده‌اند. ولی به‌منظور بررسی روش MMPC چون هیچ محدودیتی برای تغییرات جریان DC در دو لینک HVDC وجود ندارد هر دو لینک در مد کنترلی توان ثابت/زاویه خاموشی ثابت (یعنی ترکیب کنترلی PP) کنترل می‌گردند. لازم به‌ذکر است که نتایج نشان داده شده به دنبال اعمال افزایش سطح درخواست توان به میزان ۱۵٪ (۰/۱۵ p.u.) به لینک اول HVDC اجرا شده‌اند. شکل ۸، نقاط کار مختلفی که شبیه‌سازی‌های سیستم در آن نقاط انجام شده است را با نمادهای X_1 ، X_2 و X_3 نشان می‌دهد که با توجه به فرضیات گفته شده روی شکل، مشخصه‌ها و مرزهای پایداری توان حاصله از دو روش SMPC و MMPC نیز به‌دست آمده‌اند تا پایداری یا ناپایداری نقاط کار

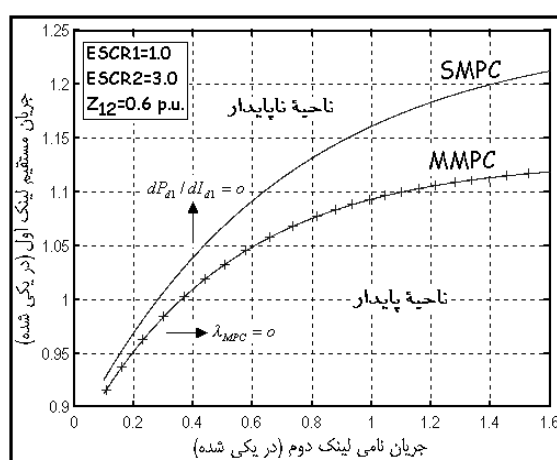
قرار گرفته است و از طرفی، در ناحیه ناپایدار مرز مدال حداکثر توان است. شکل ۹ نتایج شبیه‌سازی سیستم دو میدله را در ترکیب کنترلی PP (روش MMPC) و به دنبال اغتشاش مفروض نشان می‌دهد که ناپایداری توان بارز است. عکس این وضعیت در شکل ۱۰ که نتایج شبیه‌سازی سیستم دو تزریق را به دنبال همان اغتشاش ولی در ترکیب کنترلی PI (روش SMPC) نشان می‌دهد مشخص گردیده است. می‌بینید که سیستم پایداری توان و ولتاژ را حفظ نموده است. بدین صورت، قیاس میان نتایج ناهمسان اخذ شده از دو روش SMPC و MMPC با مقایسه نتایج شبیه‌سازی برگرفته شده از دو شکل ۹ و ۱۰ که هر دو به دنبال اغتشاشی برابر و در نقطه کاری مشابه به دست آمده‌اند ولی مد کنترلی سیستم، یعنی روش تحلیل پایداری توان در آن دو متغایر است به انجام رسیده و تفاوت مرز پایداری محاسبه شده توسط این دو روش به تأیید می‌رسد. توجه کنید که افزایش سطح توان با افزایش سطح سفارش جریان DC در بلوک کنترلی سمت اینورتر سیستم اجرا می‌شود.

جریان DC در بلوک کنترلی سمت اینورتر سیستم اجرا می‌شود. نقطه کار X_3 بر اساس هر دو روش استاندارد و مدال در ناحیه ناپایدار شکل ۸ قرار گرفته است. در این حالت، بر عکس نقطه کار X_1 روی همان شکل، چون ناحیه ناپایدار بر طبق روش SMPC کوچک‌تر می‌باشد، نتایج شبیه‌سازی نیز در ترکیب کنترلی PI (یعنی بر اساس روش SMPC) به دست آمده‌اند که شکل ۱۱ نمایش دهنده آن‌ها می‌باشد و ناپایداری توان و ولتاژ سیستم مشخص است. اضافه می‌گردد، همان‌طور که گفته شد نتایج شبیه‌سازی به منظور مقایسه میان دو روش SMPC و MMPC در یک نقطه کار و به دنبال یک اغتشاش هم‌سان به دست آمده است ولی مد کنترلی سیستم در این دو حالت متفاوت است چرا که حل سیستم برای روش MMPC مد PP و برای روش SMPC مد PI باید باشد. البته باید گفت، مدهای کنترلی لینک‌های DC در حاشیه پایداری نقش دارند ولی از میان چند مد کنترلی رایج، مد کنترلی ولتاژ DC ثابت است که تاثیر قابل ملاحظه و زیادی روی حاشیه پایداری توان می‌گذارد و دو مد کنترلی توان ثابت و جریان ثابت آن هم در سمت یکسوکنندگی تفاوت چندانی از لحاظ حد پایداری با یکدیگر ندارند. در واقع مد کنترلی لینک HVDC در سمت اینورتری نقش بسزایی در پایداری سیستم اعمال می‌کند.

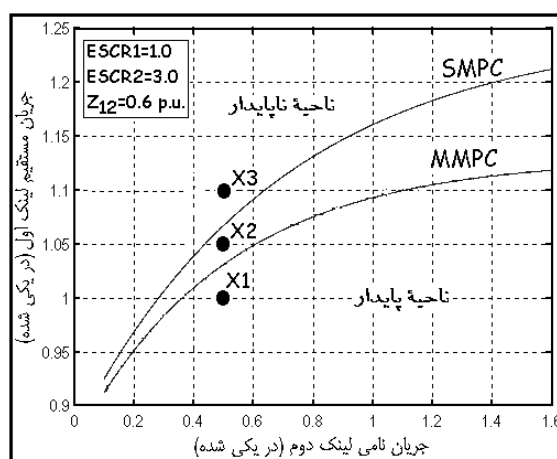
۸. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله، دو روش تحلیلی که اولی بر اساس پوش‌های حداکثر توان و دومی بر پایه تکنیک مدال (تجزیه به مقادیر ویژه) می‌باشند به منظور ارزیابی و مطالعه پایداری توان در سیستم‌های چند تزریقه HVDC ارائه گردید. البته پیش از ارائه این دو روش، روش‌های تحلیل پایداری ولتاژ و توان در سیستم‌های تک تزریقه HVDC یک مرور کلی، سریع و مفید شد که جامع موضوع در مقاله‌ای آرایه گشته است.

۱۰ که نتایج شبیه‌سازی سیستم دو تزریقه را به دنبال همان اغتشاش ولی در ترکیب کنترلی PI (روش SMPC) نشان می‌دهد مشخص گردیده است. می‌بینید که سیستم پایداری توان و ولتاژ را حفظ نموده است. بدین صورت، قیاس میان نتایج ناهمسان اخذ شده از دو روش SMPC و MMPC با مقایسه نتایج شبیه‌سازی برگرفته شده از دو شکل ۹ و ۱۰ که هر دو به دنبال اغتشاشی برابر و در نقطه کاری مشابه به دست آمده‌اند ولی مد کنترلی سیستم، یعنی روش تحلیل پایداری توان در آن دو متغایر است به انجام رسیده و تفاوت مرز پایداری محاسبه شده توسط این دو روش به تأیید می‌رسد. توجه کنید که افزایش سطح توان با افزایش سطح سفارش جریان DC در بلوک کنترلی سمت اینورتر سیستم اجرا می‌شود.



شکل ۷. مقایسه نواحی پایدار با استفاده از روش‌های SMPC و MMPC در سیستم دو تزریقه

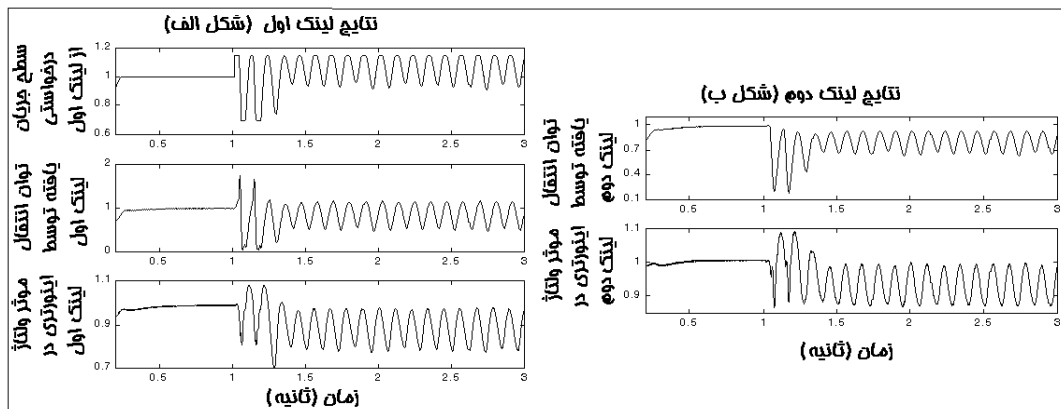


شکل ۸. تعیین نقاط کار استفاده شده برای شبیه‌سازی‌های دینامیکی در صفحه Id1-IdN2

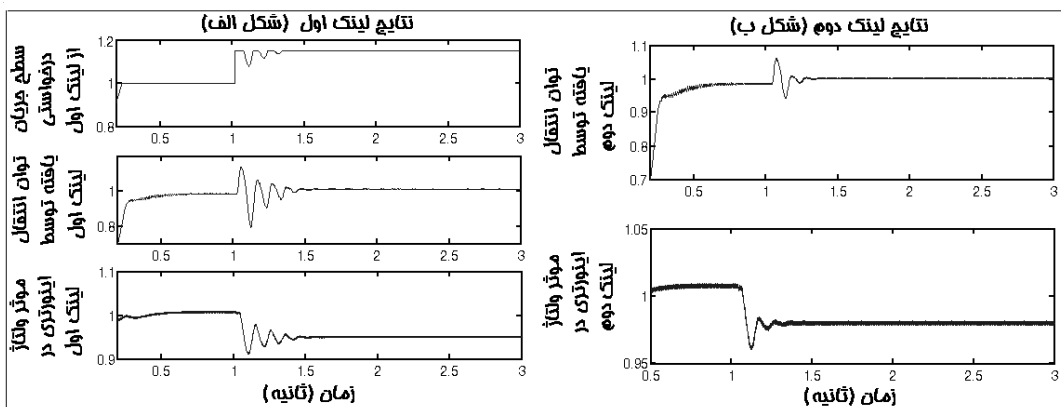
با توجه به نقطه کار X_2 روی شکل ۸ عدم هم‌زمانی مرزهای پایداری توان بر طبق دو روش استاندارد و مدال واضح است. همان‌طور که پیداست، این نقطه کار در ناحیه پایدار مرز استاندارد حداکثر توان

جدول ۱. شرایط و اطلاعات سیستم دو تزریقه برای مطالعه نتایج شبیه‌سازی

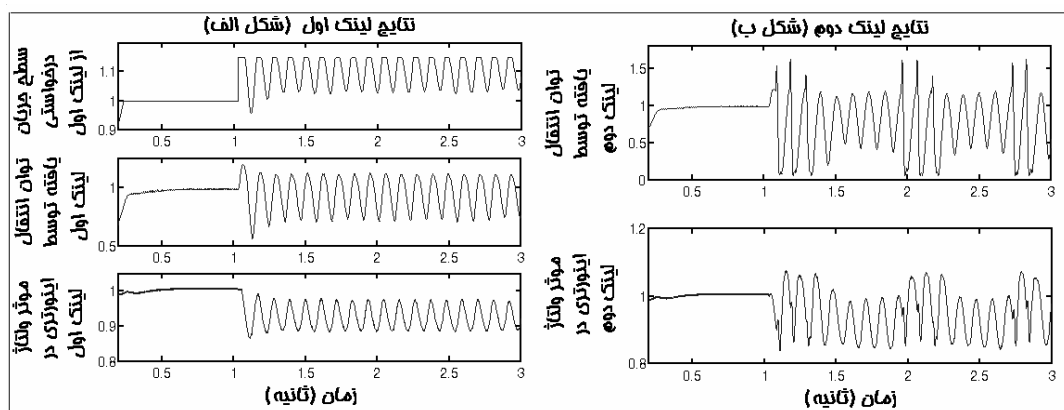
نتیجه شبیه‌سازی و شماره شکل	روش تحلیل پایداری	P_{d2N} (p.u)	P_{d1N} (p.u)	Z_{12} (p.u)	ESCR2	ESCR1	نقطه کار سیستم روی شکل (۸)
ناپایدار - شکل (۹)	MMPC	۰/۵	۱/۰۵	۰/۶	۳	۱	X_2
پایدار - شکل (۱۰)	SMPC	۰/۵	۱/۰۵	۰/۶	۳	۱	X_2
ناپایدار - شکل (۱۱)	SMPC	۰/۵	۱/۱	۰/۶	۳	۱	X_3



شکل ۹. نتایج شبیه‌سازی در نقطه کار X_2 از روش MMPC و در ترکیب کنترلی PP



شکل ۱۰. نتایج شبیه‌سازی در نقطه کار X_2 از روش SMPC و در ترکیب کنترلی PI



شکل ۱۱. نتایج شبیه‌سازی در نقطه کار X_3 از روش SMPC و در ترکیب کنترلی PI

- [6] Reeve J., Lane-Smith S.P., "Multi-Infeed HVDC Transient Response and Recovery Strategies", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol.8, No.4, pp. 1995-2001, Oct 1993.
- [7] Pilotto L.A.S., et.al., "Synchronising and Damping Torque Modulation Controllers for Multi-Infeed HVDC Systems", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol.10, No.3, pp. 1505-1513, Jul 1995.
- [8] Ainsworth J.D., Gavrilovic A., Thanawala H.L., "Static and Synchronous Compensators for HVDC Transmission Convertors Connected to Weak AC Systems", paper 31-01, Cigre general session, pp.1-11, Paris, France, 1980.
- [9] Hammad A.E., Sadek K., "A New Approach for the Analysis of and Solution of AC Voltage Stability Problems at HVDC Terminals", Proceedings of International conference on DC Power Transmission, Montreal, Canada, pp.164-170, Jun 1984.
- [10] Hammad A.E., Kuhn W., "A Computational Algorithm for Assessing Voltage Stability at AC/DC Interconnections", IEEE Trans. On Power Systems, Vol. PWRS-1, No.1, PP. 209-216, Feb 1986.
- [11] Aik D.L.H., Andersson G., "Voltage Stability Analysis of Multi-Infeed HVDC Systems", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol.12, No.3, pp. 1309-1318, Jul 1997.
- [12] Gao B., Morison K.G. and Kundur P., "Voltage Stability Evaluation Using Modal Analysis", IEEE Trans. On Power System, Vol.7, No.4, pp. 1529-1542, Nov 1992.

ضمائم

الف) معرفی پارامترها و کمیات مشخص شده در اشکال ۱ و ۲ برای آرایش‌های تک و چند تزریقه	
اندازه و زاویه ولتاژ شین AC مبدل‌های اینورتری	$U \angle \delta$
اندازه و زاویه ولتاژ معادل تونن شبکه AC	$E \angle \psi$
امپدانس معادل اتصال کوتاه شبکه AC	$Z \angle \theta$
میزان مصرف توان راکتیو مبدل‌های اینورتری	Q_d
میزان توان اکتیو تزریق شده به شبکه AC از سمت اینورتری	P_d
افت اندوکتیو DC مبدل‌ها	d_x
زاویه خاموشی مبدل‌های اینورتری و زاویه همپوشانی آنها	μ, γ
جریان لینک DC و ولتاژ پایانه DC	U_d, I_d
مقادیر جریان‌سازی بانک‌های شانت خازنی	$Q_c(b_c)$
نسبت تپ ترانس مبدل اینورتری	τ

به‌جهت مطالعه پدیده پایداری توان در سیستم‌های چند تزریقه HVDC یک مدل‌سازی ریاضی برای محاسبه ماتریس ژاکوبین تقلیل یافته پخش توان PI در شرایط استاتیکی به انجام رسیده است. در این مقاله نشان داده شد که شاخص‌ها و مشخصه‌های پایداری توان بر اساس هر دو روش ارائه شده به پارامترهای اساسی سیستم از جمله قوت الکتریکی اتصالات AC/DC و امپدانس خطوط AC میان زیرسیستم‌ها و نیز نسبت پایه توان DC (PBR) وابسته‌اند. همچنین، در بخش ششم، با تحلیل مشخصه‌های پایداری توان قیاس و عدم تطابق حواشی پایداری توان بر اساس دو روش SMPC و MMPC به انجام رسید. نتیجه اخذ شده از این بخش این می‌تواند باشد که روش MMPC نسبت به SMPC دقیق‌تر بوده و حاشیه پایداری توان محافظه‌کارانه‌تری را به‌دست خواهد داد و البته روش SMPC نیز دارای این مزیت است، که می‌توان حاشیه پایداری را در هر نقطه کار مورد نظری توسط نموداری سه‌بعدی که نمایش‌گر پوش‌های توان حداکثر هستند ملاحظه کرد و حد پایداری توان را از روی این نمودار به‌دست آورد. در آخرین بخش مقاله نیز تطابق نتایج شبیه‌سازی با مقادیر بحرانی پارامترهای سیستم که توسط روش تحلیلی پیش‌بینی می‌شوند نشان داده شده و به بحث و تأیید رسیده است.

مراجع

- [۱] میرسپاسی محمد رضا، نجفی حمیدرضا، شولایی عباس، "تحلیل و بررسی پایداری ولتاژ و توان در مدهای مختلف کنترلی یک سیستم تک تزریقه HVDC، هفدهمین کنفرانس بین‌المللی برق، جلد اول؛ مطالعات سیستم و برنامه ریزی، آبان ۱۳۸۱.
- [2] "Guide for Planning DC Links Terminating at AC Systems Locations having Low Short-Circuit Capacities , Part1: AC/DC Interaction Phenomena", CIGRE-IEEE Joint WG 14.07/15.05.05, Cigre technical phenomena 68, Paris, France, 1991.
- [۳] میرسپاسی محمد رضا، تحلیل پایداری ولتاژ و توان و بررسی تأثیر مشخصه‌های بار روی حواشی پایداری در سه آرایش از سیستم‌های HVDC، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، اسفند ۱۳۸۱.
- [4] Bui L.X., Sood V.K. and Laurin S., "Dynamic Interactions between HVDC Systems Connected to AC Buses in Close Proximity", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 6, No. 1, pp. 223-230, Jan 1991.
- [5] Szechtman M., et.al., "The Behaviour of Several HVDC Links Terminating in the Same Load Area", Cigre general session, Paris, France, paper 14-201, 1992.

ب) روابط زیر ماتریس‌های ماتریس ژاکوبین پخش توان PI در آرایش دوتزریق سیستم‌های HVDC

$J_{DI} = \begin{bmatrix} n_1(U_1 \cos \gamma_1 - 2d_{x1}I_{d1}) & o \\ o & n_2(U_2 \cos \gamma_2 - 2d_{x2}I_{d2}) \end{bmatrix}, \quad J_{D\delta} = o$
$J_{DU} = \begin{bmatrix} U_1 n_1 I_{d1} \cos \gamma_1 & o \\ o & U_2 n_2 I_{d2} \cos \gamma_2 \end{bmatrix}, \quad J_{PI} = \begin{bmatrix} -n_1(U_1 \cos \gamma_1 - 2d_{x1}I_{d1}) & o \\ o & -n_2(U_2 \cos \gamma_2 - 2d_{x2}I_{d2}) \end{bmatrix}$
$J_{P\delta} = \begin{bmatrix} Q_{d1} + U_1^2.ESCR1 + \frac{U_1^2}{Z_{12}} & \frac{-U_1 U_2}{Z_{12}} \cos(\delta_1 - \delta_2) \\ \frac{-U_1 U_2}{Z_{12}} \cos(\delta_1 - \delta_2) & Q_{d2} + PBR.U_2^2.ESCR2 + \frac{U_2^2}{Z_{12}} \end{bmatrix}$
$J_{PU} = \begin{bmatrix} P_{d1} - U_1 n_1 I_{d1} \cos \gamma_1 & P_{12} \\ -P_{12} & P_{d2} - U_2 n_2 I_{d2} \cos \gamma_2 \end{bmatrix}, \quad J_{QI} = \begin{bmatrix} U_1 n_1 \sin(\gamma_1 + \mu_1) & o \\ o & U_2 n_2 \sin(\gamma_2 + \mu_2) \end{bmatrix}$
$J_{Q\delta} = \begin{bmatrix} P_{d1} & -P_{12} \\ P_{12} & P_{d2} \end{bmatrix}$
$J_{QU} = \begin{bmatrix} Q_{d1} + U_1^2.ESCR1 + \frac{U_1^2}{Z_{12}} - U_1 n_1 I_{d1} \sin(\gamma_1 + \mu_1) & \frac{-U_1 U_2}{Z_{12}} \cos(\delta_1 - \delta_2) \\ \frac{-U_1 U_2}{Z_{12}} \cos(\delta_1 - \delta_2) & Q_{d2} + PBR.U_2^2.ESCR2 + \frac{U_2^2}{Z_{12}} - U_2 n_2 I_{d2} \sin(\gamma_2 + \mu_2) \end{bmatrix}$
<p>در زیرماتریس‌های فوق دو عبارت مربوط به پارامترهای n_1 , n_2 به صورت زیر می‌باشند:</p>
$n_1 = \frac{1}{U_{N1} \cos \gamma_{N1} - I_{dN1} d_{x1}}, \quad n_2 = \frac{1}{U_{N2} \cos \gamma_{N2} - I_{dN2} d_{x2}}$